

# COMPORTAMIENTO SISMICO DE PORTICOS DE CONCRETO ARMADO BAJO LA INFLUENCIA DE LA PORCION FUERTE EN UN SUELO BLANDO

Hermenegildo Rodríguez Gómez.  
rodriguezh@ucla.edu.ve

Profesor Asociado Dpto. de Ingeniería Estructural, Decanato de Ingeniería Civil. Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural ( Universidad de Los Andes, Convenio U.L.A - U.C.L.A.) Doctorante en la Universidad Politécnica de Cataluña, España, en el Área de Ingeniería Sísmica y Dinámica Estructural. Línea de investigación: Modelaje y Análisis de Juntas de Concreto Armado Reforzadas con FRP

## RESUMEN

Uno de los parámetros de los movimientos sísmicos más ampliamente usado y asociado con el potencial destructivo del sismo ha sido la aceleración máxima del suelo. Sin embargo, se ha verificado experimentalmente que no existe una relación directa entre ellos, ya que se da el caso de sismos que a pesar de sus grandes aceleraciones máximas no produce mayor daño, reconociendo que la amplitud máxima de la aceleración es un indicador pobre del potencial destructivo del sismo. Debido a la complejidad del fenómeno sísmico, no es fácil definir parámetros que permitan obtener la porción fuerte de un evento sísmico cualquiera, que permita evaluar su comportamiento en estructuras de concreto armado, por tal razón, previo al estudio es necesario adoptar una definición que permita obtener la cantidad del sismo considerada como porción fuerte. No obstante, esto se lleva a cabo mediante la utilización de registro historia-tiempo de aceleración y su respectivo espectro de respuesta elástica de aceleración, utilizados para determinar la porción fuerte del fenómeno físico.

**PALABRAS CLAVES:** *acelerograma, daño, suelo blando, potencial de daño, porción fuerte.*

Recibido: Diciembre 2013- Aceptado: Abril 2014

## SEISMIC BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE PORTICOES UNDER THE INFLUENCE OF THE STRONG PORTION IN A SOFT SOIL

### ABSTRACT

The soil maximum acceleration is one of most widely used seismic disturbance parameters and it is associated with the earthquake destructive potential. However, there is no direct relationship between them since some earthquakes with large maximum accelerations do not cause further damage, recognizing that the acceleration maximum amplitude is a poor indicator of an earthquake destructive potential. Due to the earthquake complexity, it is not easy to define parameters which are able to obtain the strong portion of any seismic event to assess its behavior in reinforced concrete structures. For that reason, a definition to get the amount of portion considered as strong earthquake is previously needed. Nevertheless, this is performed using log-acceleration time history and its respective acceleration elastic response spectrum used to determine the stronger portion of the physical phenomenon.

**Keywords:** *accelerogram, damage, soft soil, damage potential, strong portion*

## INTRODUCCIÓN

De los importantes acelerogramas que se ha obtenido en el mundo en los últimos años para diversos tipos de terremotos, sólo un número reducido de ellos corresponde a registros obtenidos en zonas que han sufrido daño efectivo. No obstante, normalmente se calculan espectros de respuesta con requerimiento de ductilidad a partir de espectros de respuesta elástico, para registros que no produjeron daño real, representados y justificados por Normas y Códigos que se aceptan tácitamente, asumiendo que contiene predicciones confiables que resguardan la seguridad de las estructuras frente a futuras acciones sísmicas.

Sin embargo, es posible encontrar en la literatura un número importante de parámetros que se han propuesto para evaluar la capacidad de daño de un sismo. La mayor parte de estos parámetros se propusieron estudiando directamente los registros sísmicos historia-tiempo, en donde se tiene que uno de los parámetros sísmicos más ampliamente asociado con el daño ha sido la aceleración máxima del suelo y su duración, sin considerar la respuesta estructural, en tal razón se plantea una nueva definición de movimiento fuerte (porción fuerte de un sismo) que permita utilizar como parámetro principal el espectro de respuesta de aceleración, por constituir una herramienta principal y de importancia en el diseño estructural.

En este sentido, se establece un análisis del comportamiento de la porción fuerte del sismo en estructuras aporticadas de concreto armado, considerando el registro historia-tiempo del evento sísmico; para poner en práctica la evaluación del sismo en la estructura teniendo en cuenta el concepto de energía, que hoy en día es considerada como un parámetro principal en la evaluación sísmica. Se utiliza un modelo de daño que se basa en el empleo de concepto de energía en un programa comercial de elementos finitos, con el fin de hacer el análisis y evaluación de estructuras aporticadas de elementos de concreto armado. El modelo se fundamenta en la mecánica de la fractura, la teoría

de daño continuo y el modelo de plasticidad concentrada.

## MARCO METODOLÓGICO

Durante el transcurso del trabajo se consideró los diferentes procedimientos establecidos por varios autores en la determinación de la porción fuerte, cada uno con argumentos y planteamientos diferentes, orientados en la búsqueda de la porción fuerte del sismo en el registro historia-tiempo, algunos establecen relaciones para usarse en evaluaciones de riesgo sísmico, otras evalúan el poder destructor del sismo, valoran el potencial de licuefacción, etc.

En el presente trabajo se establece una definición de la porción fuerte basada en la respuesta estructural y relacionada, por consiguiente, con las características estructurales específicas, en donde el espectro de respuesta constituye una herramienta importante por la relación entre el sismo y la respuesta estructural.

Se comienza con el desarrollo de una definición de la porción fuerte del sismo, que permitan desarrollar técnicas para seleccionar los movimientos fuertes durante un evento sísmico para el diseño sismorresistente. Posteriormente, la porción fuerte es aplicada en la base de estructuras de concreto armado evaluando la relación de los diferentes sismos en la respuesta con el parámetro de daño, término que involucra el concepto de energía y deformación inelástica.

Para proceder con la investigación se utilizaron los programas desarrollado por Paz (1992) y Febres (1991), que determinan los espectros de respuestas a partir de registro de aceleración historia-tiempo digitalizados en función del período o frecuencia. Durante el estudio se utilizó el programa de Mario Paz para generar la porción fuerte del sismo para lo cual fue necesario su modificación para adecuarlo a los requerimientos de la investigación. La modificación consiste en obtener el registro historia-tiempo de la porción fuerte mediante comparaciones sucesivas de dos espectros de aceleración, el primero

correspondiente al registro completo y el segundo al registro recortado (Porción Fuerte), utilizando como criterio de error del  $\pm 5\%$  de la respuesta espectral con respecto al original.

Por último, la porción fuerte obtenida es aplicada a la estructuras de concreto armado para evaluar su respuesta estructural frente al registro historia-tiempo completo, utilizando el parámetro de daño que relaciona el concepto de energía y deformación inelástica.

### DEFINICIÓN DE LA PORCIÓN FUERTE

Para el diseño sismorresistente el ingeniero se apoya en los espectros de respuesta; estos reflejan el comportamiento estructural durante el evento sísmico, de tal manera que el espectro de aceleración puede ser usado para definir la porción fuerte del registro sísmico.

En general, según Bommer y Martínez (1996), la duración del movimiento fuerte se relaciona al número de ciclos de movimiento del sismo, considerado como un parámetro importante que es determinado por la respuesta en estructuras y fundaciones. Por lo tanto, se estima que el movimiento fuerte del sismo está representado en el espectro de respuesta por el acelerograma (registro historia-tiempo) en un intervalo de tiempo obtenida por la definición de la porción fuerte, de tal manera que conserve las características principales del evento sísmico representado en el espectro de respuesta, así como la influencia de la distancia epicentral (Vielma, Lobo y Rivero, 2006).

La evaluación de los registros sísmicos a partir de las aceleraciones espectrales, permite determinar los valores máximos y el tiempo en que ocurren para así considerar que el tiempo final corresponde al tiempo mayor del acelerograma que muestra la respuesta máxima calculada de un conjunto de osciladores armónicos simples amortiguados, con diferentes frecuencias naturales, determinando el intervalo de tiempo en donde ocurre la porción fuerte.

Definida la porción fuerte de cada registro, se realiza el ajuste en los lapsos de tiempo inicial y final de los acelerogramas. En la corrección se busca inicializarlos en cero, conservando la línea base y las características del registro original de aceleración en el tramo seleccionado.

### RESPUESTA SÍSMICA

El análisis del pórtico de concreto armado se realizó mediante el modelo de daño concentrado desarrollado por Flórez (1993) usado como subrutina en el programa comercial de elementos finitos ABAQUS (2000), el cual permite el análisis no lineal de la estructura incorporando el modelo histerético de daño a través de la subrutina de usuario. Este análisis toma en cuenta la degradación de rigidez y resistencia considerado por Picón (1999), deformación plástica por fluencia del refuerzo, daño por agrietamiento de concreto y por fatiga de bajo ciclaje, así como, los efectos de grandes desplazamientos P- $\Delta$ , influencia de la variación de la carga axial en el comportamiento a flexión, secciones no simétricas. El análisis del pórtico se procesa en dos secciones. El primer análisis procesa la entrada de datos con el registro sísmico original (completo) presentado la salida de resultados. El segundo mientras procesa el pórtico con el registro sísmico que muestra la porción fuerte, con la salida de resultados de ambos casos se presenta las relaciones del comportamiento dinámico.

Para este estudio se escogió el diseño de dos pórtico de concreto armado con vigas regulares compuesto por niveles diferentes, el primero diseñado por Quintero (1997) con vigas planas y recalculado por Espinosa (2002) con vigas altas manteniendo la resistencia última de cada viga y que consta de 12 pisos y 7 vanos, el segundo diseñado por Delgado, Sarcos, Flórez, Picón y Marante (2003) compuesto de 4 pisos y 3 luces, las dimensiones de cada uno de los pórticos y su enumeración de los elementos están dados en la Figura 1 y 2 para los edificios de 12 y 4 pisos respectivamente.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Partiendo de los registros de historia de aceleraciones, se seleccionaron dos registros del terremoto de Kobe de 16/01/1995, el primero identificado como OSA000 con distancia epicentral de 8,5 km y el segundo SH1000 con una distancia epicentral de 15,5 km, previo al análisis se realiza una evaluación de la definición de la porción fuerte aplicada a los registros sísmicos de aceleración historia-tiempo y condiciones de suelos por ser parámetros de interés en la ingeniería. Se considera primero el análisis entre las relaciones de las curvas espectrales obtenidas, para los registros completos y las características propias de la porción fuerte.

La base del método utilizado para obtener la porción fuerte considera un comportamiento lineal elástico. Esta porción fuerte es evaluada procesando los registros sísmicos originales en dos pórticos de concreto armado para estudiar su comportamiento en el rango inelástico, reflejado en el parámetro o variable de daño, representado por rótulas inelásticas en los extremos de cada miembro o elemento, mediante el uso del modelo Simplificado de Daño para Pórticos de Concreto Armado procesado en un programa de elemento finito. Cada pórtico es sometido al sismo representado por el registro de historia aceleración completo y posteriormente al registro historia aceleración de la porción fuerte.

## ANÁLISIS ESPECTRALES

Para el análisis se utiliza los parámetros espectrales de aceleración, máxima energía, amplitudes de Fourier de aceleración y se basa fundamentalmente en la comparación gráfica de los elementos que componen las gráficas espectrales tales como el período predominante de los valores máximos y configuración de las curvas representadas en las figuras.

La diferencia entre el espectro de aceleración presentadas a la derecha de las Figuras 3 y 4 correspondiente al registro completo, y el presentado

a izquierda del registro con la porción fuerte, no es significativa para ninguno de los registros procesados, conservando la relación del error (Acc) Completo/(Acc)Porción Fuerte dentro del margen estipulado del  $\pm 5\%$  para un mismo período. Se puede notar que en algunos registros la porción fuerte sufre un pequeño incremento en la amplitud de la aceleración máxima espectral, conservando prácticamente el mismo período predominante. En relación con este aspecto es de hacer notar que el error entre ambos registros se conserva dentro del  $\pm 5\%$  para las aceleraciones espectrales determinadas en el mismo período; es probable que la relación entre las aceleraciones máximas (Accmax)Completo/(Accmax)Porción Fuerte presentada resulte con un error mayor al  $\pm 5\%$  y se debe a que la aceleración máxima espectral se manifiesta en períodos predominante diferentes en ambos registros.

En vista de que los registros historia-tiempo de velocidad y desplazamiento son obtenidos por derivación del acelerograma, se considera que la relación obtenida para el espectro de aceleración se mantiene para los espectros de velocidad y desplazamiento, con sus respectivos espectros de Fourier.

En las gráficas de espectros de energía máxima no se observan diferencias significativas en su comportamiento gráfico al evaluarse en la porción fuerte y el registro original del sismo, manteniendo los valores máximos de amplitud de aceleración en la mayoría de los registros con el mismo período predominante, la relación de las lecturas espectrales mantiene un error dentro del margen establecido del  $\pm 5\%$ . Se muestran que el máximo ocurre en el registro de la porción fuerte (Figuras 3 y 4) reflejando la posibilidad de que a pesar de su corta duración la porción fuerte puede representar un registro con características proporcionales al registro original del sismo. Los valores máximo del espectro de energía que fueron superadas por la porción fuerte, se debe a las velocidades iniciales del registro que resultan ser mayores que la suministrada por el evento sísmico original.

Para los espectros de energía máxima y acelera-

Terremoto de Kobe, 16/01/1995  
Comp: 00°, DE=8.5 km.  
Suelo con Vs menores de 180 m/s (Suelo Blando)

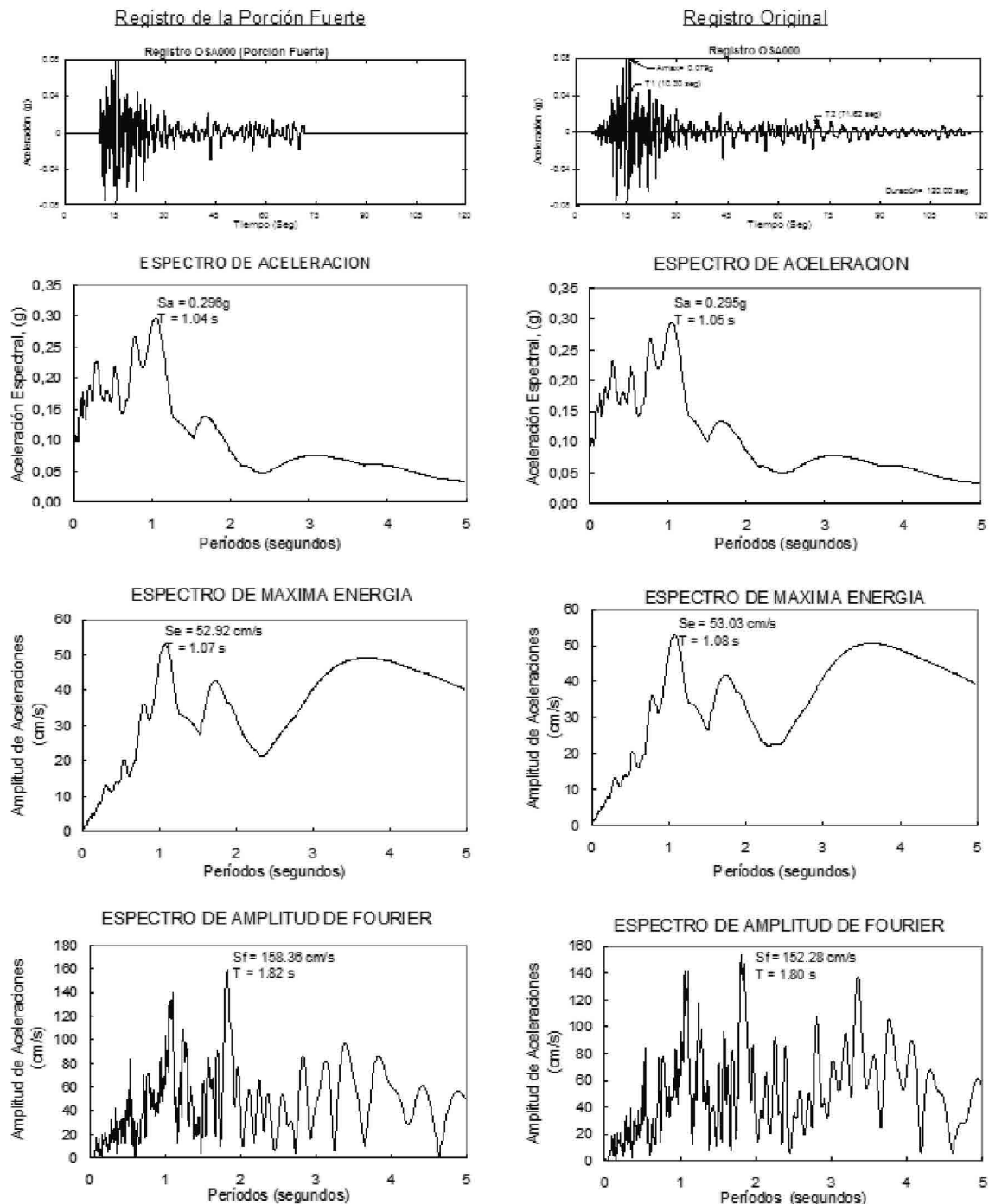


Figura 3. Respuesta espectral con 5% de amortiguamiento sometido al registro OSA000

Terremoto de Kobe, 16/01/1995  
 Comp: 00°, DE=15.5 km.  
 Suelo con  $V_s$  menores de 180 m/s (Suelo Blando)

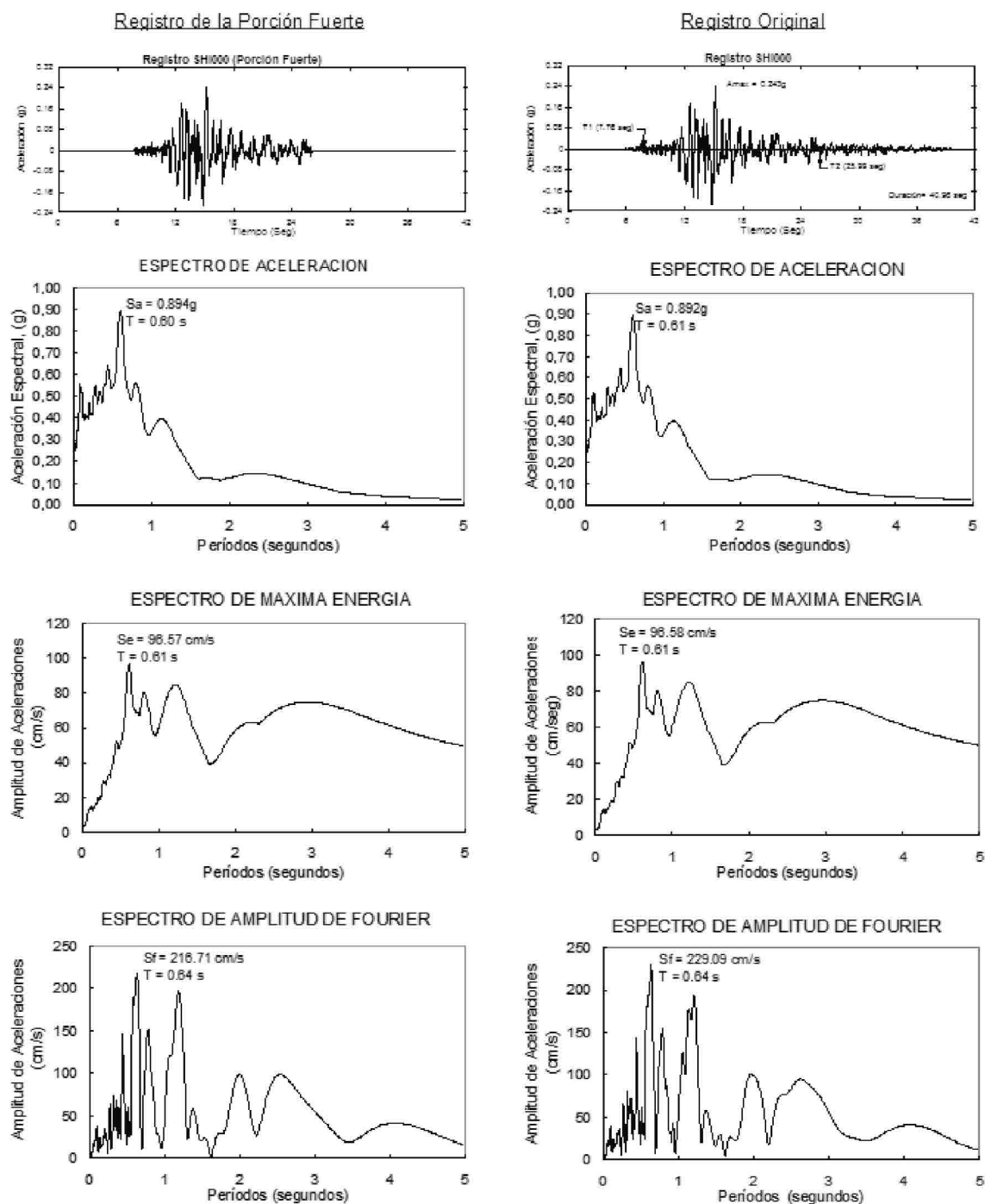


Figura 4. Respuesta espectral con 5% de amortiguamiento sometido al registro SH1000



ción, la curva relativa a la porción fuerte presenta algunos trazados más suave sin que se generen diferencias significativas al graficar bajo el espectro original.

Con respecto al espectro de amplitudes de Fourier se aprecia que son más susceptibles a los cambios que sufre el registro historia-tiempo con relación a la duración y al contenido frecuencial del sismo. Por esta razón algunos registros marcan diferencias significativas en las magnitudes de las amplitudes máximas entre la porción fuerte y el original de los espectros de Fourier, reportando un error que supera el  $\pm 5\%$  en algunos casos, por otra parte, se tiene que las amplitudes máximas conservan el mismo período predominante en todos los registros estudiados, otro aspecto se refiere a la trayectoria gráfica del espectro las cuales siguen una configuración aproximadamente igual al original mediante un trazado promedio representado en el espectro de la porción fuerte. Es de hacer notar en el registro OSA000 (Figura 3) que la amplitud máxima del espectro de Fourier resulta ser mayor el representado en la porción fuerte, superando al obtenido en el registro original.

De acuerdo a lo planteado el parámetro espectral de la amplitud de Fourier marca una diferencia en las características paramétricas de la porción fuerte, por lo que se considera necesario realizar un estudio basado en un comportamiento no lineal para evaluar su resultado en términos de energía representados en una variable de daño y verificar la diferencia del error que se obtiene.

## COMPORTAMIENTO INELÁSTICO

En la evaluación del comportamiento no lineal se utiliza el programa de elemento finitos ABAQUS

(versión 6.2) determinando la respuesta inelástica bidimensional (2D) mediante la incorporación de un modelo Simplificado de Daño aplicado en un pórtico de concreto armado de 12 pisos para el registros sísmicos (SH1000). Por otra parte, se evaluaron dos pórticos de concreto armado de 12 y 4 pisos en el programa denominado PORTAL DE DAÑO utilizando el mismo modelo de degradación para los registros sísmicos (OSA000, SH1000).

Los registros sísmicos seleccionados son aplicados al pórtico para obtener la respuesta en términos de daño. Los niveles de la variable de daño se traducen con la aparición de grietas en los nudos (rótulas inelásticas), tanto en vigas como en columnas, representados en una variable de daño que toma valores desde 0 a 1.

Nuestro interés en el estudio del análisis dinámico no lineal es verificar que la respuesta del pórtico para ambos registro (Porción fuerte y Original) presentan resultados cuyas diferencias no sean significativas y representados en un error menor o igual al  $\pm 5\%$ .

La variable de daño en los elementos del pórtico de concreto armado de 12 y 4 pisos es representado en cuatro gráficos que se muestran en las Figuras del 5(a) y 6(a), en cada gráfico se indica la variación del daño en todos los elementos que compone el pórtico según la fibra dañada y el extremo que corresponde para cada registro sísmico seleccionado, el eje de las ordenadas representa el daño para cada elemento de acuerdo al extremo y la fibra dañada, por los siguientes parámetros:

$d_1^+$  : daño en la fibra inferior extremo izquierdo del miembro o elemento.

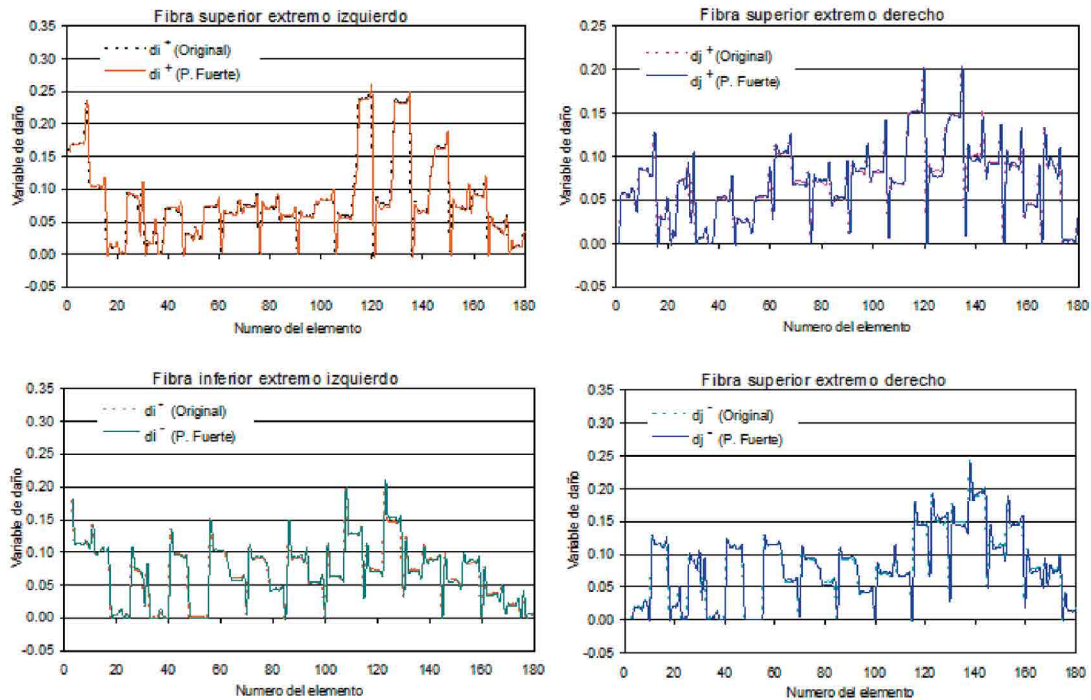
$d_1^-$  : daño en la fibra superior extremo izquierdo del miembro o elemento.

$d_2^+$  : daño en la fibra superior extremo derecho del miembro o elemento.

$d_2^-$  : daño en la fibra inferior extremo derecho del miembro o elemento.

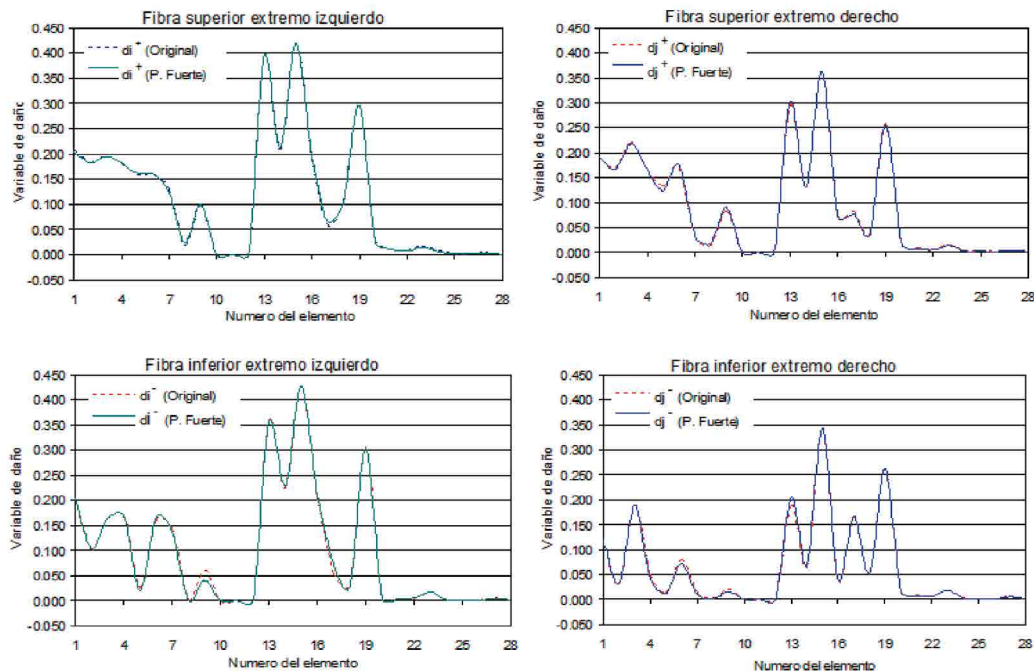


Registro: SH1000  
Variable de daño en la fibra



**Figura 5.** Representación de la variable de daño en el pórtico de 12 pisos.  
(a) Comportamiento del daño en cada elemento según la fibra dañada.

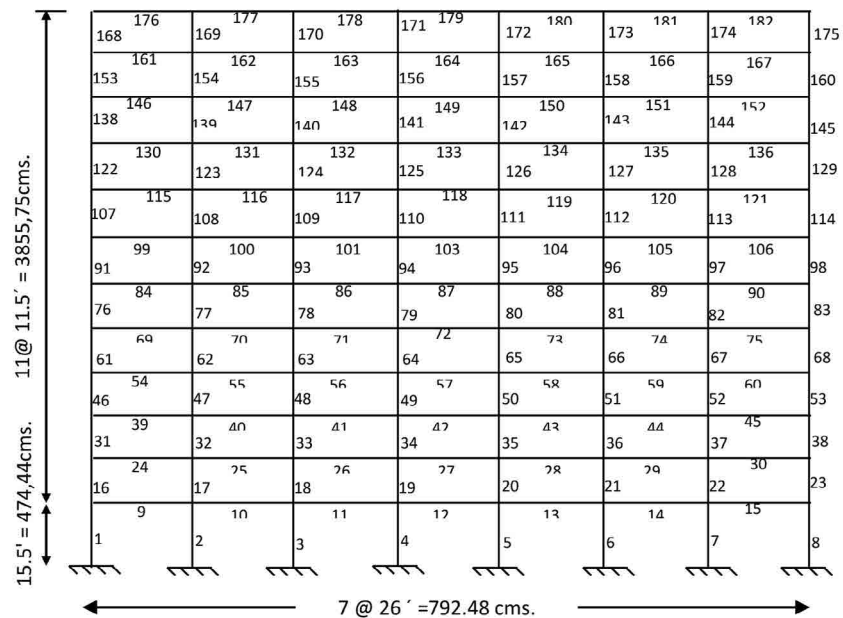
Registro: OSA000  
Variable de daño en la fibra



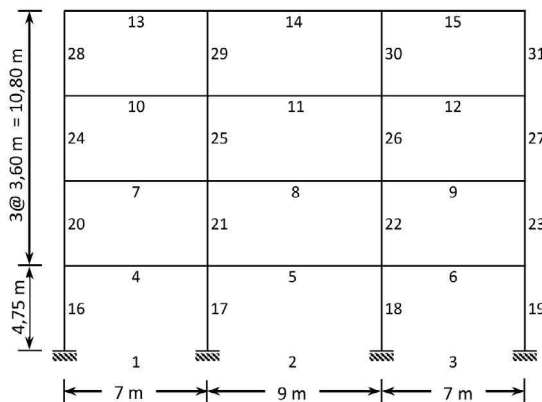
**Figura 6.** Representación de la variable de daño en el pórtico de 4 pisos.  
(a) Comportamiento del daño en cada elemento según la fibra dañada.

en el eje de las abscisa se representa el número del elemento que se indica en el pórtico de las Figuras

1 y 2.



**Figura 1.** Dimensiones del pórtico y numeración de los miembros del pórtico de 12 pisos



**Figura 2.** Dimensión y enumeración de los elementos del pórtico de 4 pisos

Se observa que al evaluar el comportamiento no lineal del pórtico ante la porción fuerte y original, respectivamente, la diferencia entre los resultados no es significativa, manteniendo una diferencia en el margen de error menor al  $\pm 5\%$ . Por otra parte, se

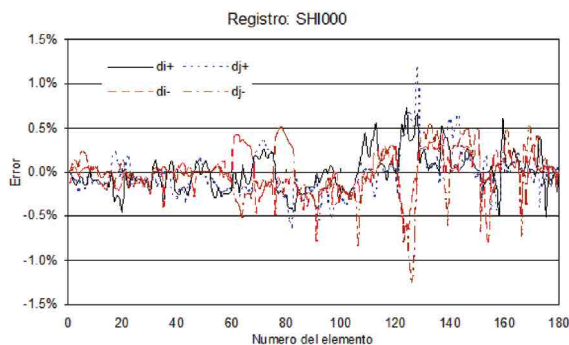
observa un aspecto interesante en algunas de las gráficas mostradas donde la porción fuerte tiene la capacidad de generar mayor daño en algunos elementos de la estructura que el registro completo, tal como se puede apreciar en el registro SH1000, representada en la Figuras 5(a). El evento sísmico sacude a una estructura de forma gradual hasta alcanzar la aceleración máxima del suelo, mientras que la porción fuerte a pesar de su corta duración sacude a la estructura violentamente por presentar aceleraciones iniciales del suelo superiores, que se traducen en fuerzas inerciales que producen el incremento en la tasa de disipación de energía, que resulta ser mayor en los primeros segundos del movimiento fuerte y decreciendo una vez alcanzada la aceleración pico.

El error en la medición del parámetro de daño se encuentra representada en función del número del elemento del pórtico de 12 pisos en las Figuras

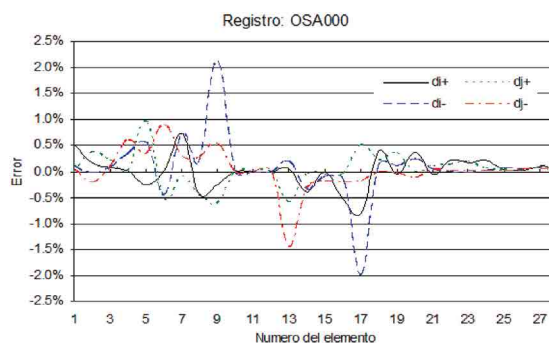
5(b) en donde se gráfica el error en términos de variación de la variable de daño que oscila entre 0 y 1 en cada elemento del pórtico según la fibra y el extremo en donde se encuentre el daño por las siguientes expresiones para cada registro sísmico seleccionado:

$$\begin{aligned} \text{Error en \%} &= [d_i^+ (\text{completo}) - d_i^+ (\text{porción fuerte})] \cdot 100 \\ \text{Error en \%} &= [d_i^- (\text{completo}) - d_i^- (\text{porción fuerte})] \cdot 100 \\ \text{Error en \%} &= [d_j^+ (\text{completo}) - d_j^+ (\text{porción fuerte})] \cdot 100 \\ \text{Error en \%} &= [d_j^- (\text{completo}) - d_j^- (\text{porción fuerte})] \cdot 100 \end{aligned} \quad (1)$$

En las Figuras 5(b) y 6(b) se observar que presenta un margen de aceptación con respecto al registro original, ubicando la variación del error por debajo del  $\pm 5\%$ . La interpretación de los resultados negativos del porcentaje de error se refiere que la variable de daño en el elemento del pórtico es mayor en la porción fuerte de la fibra en estudio, obtenida por las expresiones de la ecuación (1), es decir que las aceleraciones de la porción fuerte refleja un incremento en las fuerzas inerciales que se traduce en daño en los elementos del pórtico levemente superior al mostrado por el sismo completo.



**Figura 5.** Representación de la variable de daño en el pórtico de 12 pisos.  
(b) Variación del error en la variable de daño



**Figura 6.** Representación de la variable de daño en el pórtico de 4 pisos.  
(b) Variación del error en la variable de daño.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones del presente trabajo ponen de evidencia la posibilidad de realizar estudios aún más profundos en el campo de la ingeniería por la diversidad de información que registra los acelerogramas y su relación con el suelo.

1. La reducción obtenida en la duración del sismo mediante la definición propuesta de porción fuerte del movimiento sísmico, basado en la respuesta espectral de aceleración, permite disminuir sustancialmente el tiempo de procesamiento de datos, ya que se reducen las operaciones computacionales matemáticas en el análisis dinámico inelástico, con resultados satisfactorios que reflejan discrepancias en el orden del  $\pm 5\%$  respecto al evento sísmico original.
2. El estudio realizado de la porción fuerte en diferentes sismos, considerando el tipo de suelo, muestra una variación en el parámetro que impide evaluar una relación o una tendencia en función al tipo de suelo. Este hecho revela que la porción fuerte mantiene una relación directa con las características del acelerograma en lo que se refiere a la aceleración pico, contenido frecuencial, duración del sismo y el comportamiento estructural de estos parámetros.
3. La duración final de la porción fuerte revela una dependencia con la porción final del acelerograma,

registrada por la definición y obtenida por la aceleración espectral máxima, a partir del cual, las vibraciones disminuyen progresivamente de amplitud hasta alcanzar el reposo.

4. Los resultados obtenidos en el análisis no lineal en término de la variable de daño, reflejan que la

porción fuerte del movimiento sísmico posee una leve capacidad de generar un daño mayor que el producido por el sismo original, esto se explica por el alto contenido de energía en la tasa de disipación inicial con el incremento progresivo para alcanzar la máxima aceleración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS. "User's Manual" Release 6.2, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., Providence, RI. USA. 2000.

BOMMER, Julián y MARTINEZ, Alejandro. "The Prediction of Strong-Motion Duration Of Engineering Design". Acapulco Mexico. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering. 1996. Paper No 84.

DELGADO, Sebastián, SARCOS, Antonio, FLOREZ, Julio, PICON, Ricardo y MARANTE, María. "Daño Estructural en Pórticos Planos de Concreto Armado Diseñados Según Normas Sísmicas". Revista Internacional de Desastre Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. 2003. Vol 3, No 1.

ESPINOZA, Betsy. "Determinación de Parámetros para un Modelo de Estrangulamiento por Deslizamiento de Refuerzo". Tesis para optar al grado de Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural, Universidad de los Andes, Mérida. 2002.

FEBRES C. Rafael J. "Análisis Computarizado de Registros Sísmicos y Artificiales". Tesis para optar al grado de Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural, Universidad de los Andes, Mérida, 1991.

FLOREZ, Julio. "Modelo de Daño Concentrado para la simulación numérica del colapso de pórticos planos", Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño de Ingeniería. 1993. Vol. 9, pp 123-139.

PAZ, Mario. Dinámica Estructural. 3ra ed. Barcelona, España: Editorial Reverté, 1992. 648 p. ISBN: 84-291-4854-X.

PICON, Ricardo. "Evolución de la Degradación de Rigidez en Pórticos de Concreto Armado", Tesis para optar al grado de Magíster Scientiae en Ingeniería Estructural, Universidad de los Andes, Mérida. 1999.

QUINTERO, Carlos. "Investigation on the seismic behavior of RC interior wide-beam connections", PhD thesis, University of Michigan, EEUU. 1997.

VIELMA, Juan, WILLIAM, Lobo y RIVERO, Pedro. "Influencia de la distancia epicentral sobre los factores de reducción por ductilidad". Revista de Ingeniería de la Universidad de Costa Rica. 2006. Vol. 16, N° 1, p 59-79.

.